

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОФИЛЕЙ ПУЛЬСА РЕНТГЕНОВСКИХ ПУЛЬСАРОВ С АККРЕЦИОННОЙ КОЛОНКОЙ

И. Д. Маркозов

Санкт-Петербургский государственный университет

В ходе работы промоделированы профили пульса излучения, приходящего от рентгеновских пульсаров с аккреционной колонкой. Были учтены гравитационное линзирование и красное смещение в метрике Шварцшильда, а также отражение света от поверхности нейтронной звезды. На основе полученных профилей пульса был проведен анализ возможных ошибок в измерениях истинных светимостей рентгеновских пульсаров, связанных с невозможностью наблюдателю корректно учесть анизотропию в излучении, исходящем от нейтронной звезды, а также углы между осью вращения пульсара, магнитной осью и лучом зрения.

MODELING PULSE PROFILES IN X-RAY PULSARS WITH ACCRETION COLUMN

I. D. Markozov

Saint Petersburg State University

The pulse profiles of the radiation coming from X-ray pulsars with an accretion column were modeled. Gravitational lensing and redshift in the Schwarzschild metric, as well as the reflection of X-Ray photons from the surface of a neutron star, were taken into account. On the basis of the obtained pulse profiles an analysis of possible errors in the measurements of the luminosities of X-ray pulsars associated with the inability of the observer to correctly take into account the anisotropy in the radiation emerging from the neutron star, as well as the angles between the pulsar's rotation axis, the magnetic axis and the line of sight, was carried out.

Введение

Рентгеновские пульсары представляют собой двойные системы, где один компонент является нейтронной звездой, на которую происходит аккреция вещества со стороны звезды-компаньона. Многие нейтронные звезды обладают чрезвычайно сильными магнитными полями порядка 10^{12} – 10^{13} Гс, а также периодами вращения порядка одной секунды, и ось вращения не совпадает с магнитной осью, что приводит к феномену рентгеновского пульсара. Аккрецирующее вещество стекает вдоль магнитно-силовых линий на полюса нейтронной звезды, при столкновении с поверхностью высвечивается кинетическая энергия падающего вещества. Так светятся полярные шапки нейтронных звезд. Однако при высоких темпах аккреции появляется радиационно-доминированная ударная волна, которая поднимается вверх от поверхности НЗ. Образуется аккреционная колонка над нейтронной звездой, и в этом случае светит уже именно она, а не полярная шапка. Это значит, что излучение выходит из цилиндрической области над поверхностью нейтронной звезды, а не из части поверхности на полюсе. Высота аккреционной колонки зависит от параметров аккреции и может достигать величин, сравнимых с размерами нейтронной звезды. Как в

случае полярной шапки, так и при аккреционной колонке излучение имеет анизотропную диаграмму направленности. В данной работе представлено моделирование профилей пульса от нейтронной звезды с аккреционной колонкой. При построении теоретической модели необходимо учитывать отражение излучения колонки от поверхности нейтронной звезды, а также эффекты общей теории относительности: гравитационное линзирование и красное смещение.

Результаты были применены для оценки возможных ошибок при определении светимостей нейтронных звезд. Дело в том, что наблюдатель не имеет возможности точно учесть анизотропию излучения нейтронной звезды, поэтому при определении светимости проводятся следующие действия: поток усредняется по профилю пульса и домножается на $4\pi D^2$, где D — расстояние до нейтронной звезды. То есть к усредненному потоку применяется процедура как к источнику изотропного излучения. Однако по причине анизотропии это неминуемо должно приводить к ошибкам в значениях светимостей. На основе модели построения профилей пульса, представленной в данной работе, были проведены оценки данных ошибок.

Описание методики

Задача была разбита на этапы. Первый: построение карты распределения энергии по полярному углу. На этом этапе рассчитывалась энергия, уходящая в единицу полярного угла. Угол отсчитывался от условно верхней колонки. Полная энергия одной колонки бралась за единицу. Колонка дробилась на большое число кусков малой длины dh каждый. От каждого куска запускались лучи, расходящиеся в равноотстоящие на величину $d\theta$ углы. Каждому лучу присваивалась энергия $g(h)f(\theta)dhd\theta$, где $g(h)$ — распределение энергии по высоте колонке, а $f(\theta)$ — по углу. Далее с учетом гравитационного линзирования рассчитывалось направление, куда попадет луч (на бесконечности или на поверхности НЗ). Далее считалось, что поверхность нейтронной звезды переизлучает всю упавшую на нее энергию, причем выходящее излучение принималось анизотропным по интенсивности. Энергия, уходящая в конкретное направление от поверхности нейтронной звезды, рассчитывалась аналогичным случаем с колонкой образом (запуск и отслеживание конечных направлений лучей, исходящих из элементов поверхности НЗ).

Функция распределения светимости по высоте [1] $g(h) \propto \frac{H-h}{R+h}$, функция распределения по углу [2]

$$f = \frac{3D^4}{7\pi\gamma} (1 + 2D \sin(\alpha) \cos(\phi)) \sin^2(\alpha) \cos(\phi), \quad (1)$$

где β — скорость стенок колонки в единицах скорости света; γ — лоренц-фактор. Метрика пространства-времени шварцшильдовская. Для учета линзирования была использована следующая аппроксимационная формула [3]:

$$x = (1 - u)y \left(1 + \frac{u^2 y^2}{112} - \frac{e}{100} u y \left[\ln \left(1 - \frac{y}{2} \right) + \frac{y}{2} \right] \right). \quad (2)$$

Здесь $x = 1 - \cos(\alpha)$; $y = 1 - \cos(\psi)$; α — угол между радиус-вектором точки испускания фотона и направлением начального пульса фотона; ψ — угол линзирования.

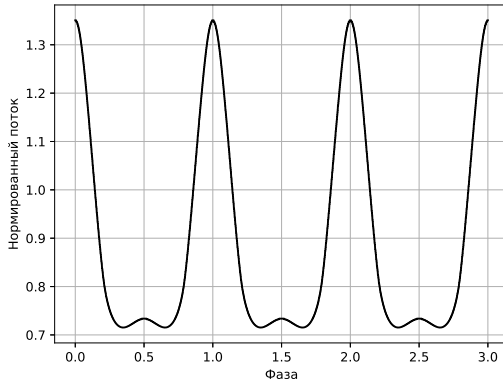
На втором этапе задачи из полученной карты распределения энергии по полярному углу строился профиль пульса для конкретного наблюдателя. Задавались углы между осью вращения нейтронной звезды и магнитной осью — θ_1 , между осью вращения и направлением на наблюдателя — θ_2 . В зависимости от фазового угла из геометрии высчитывалось, какой полярный угол будет иметь вектор направления на наблюдателя, и, исходя из этого,

на основе полученной на первом этапе карты распределения энергии получалась энергия, принимаемая наблюдателем при данном значении фазы.

На третьем этапе рассчитывались ошибки измерений истинной светимости. Наблюдаемая светимость определялась как светимость изотропного источника, дающего такой же поток излучения для конкретного наблюдателя, как и пробная НЗ. При этом учет красного смещения производился так, как если бы все фотоны излучались с поверхности нейтронной звезды. Принималось, что углы θ_1 и θ_2 являются равномерно распределенными случайными величинами. Исходя из этого вычислялись матожидание и дисперсия наблюдаемой светимости при фиксированных параметрах НЗ, а также вероятности ошибки в 10 раз.

Результаты

Моделирование проводилось для нейтронной звезды радиуса 12 км и массы 1.4 массы Солнца. Высота колонки принимала значения 0.5, 1, 2, 4, 8, 12 км. Рассматривались два предельных случая: стенки колонки покоятся и движутся со скоростью свободного падения. Ниже представлен пример промоделированного профиля пульса для высоты колонки 4 км с движущимися стенками при угле между осью вращения и направлением на наблюдателя $\frac{\pi}{4}$, между осью вращения и магнитной осью — $\frac{\pi}{3}$. Главные максимумы располагаются в



Пример профиля пульса

данном случае при целых фазах, что соответствует минимальному углу между верхней колонкой и наблюдателем. Вторичные максимумы, наоборот, лежат в точках, где верхняя колонка максимально в затмении.

Для фиксированных параметров нейтронной звезды можно оценить характерные ошибки наблюдаемой светимости. Пусть H — высота колонки в километрах, β — скорость стенок колонки (0 для покоящихся, ff для находящихся в свободном падении), L_{min} — минимально возможная светимость для наблюдателя, L_{max} — максимальная, \bar{L} — средняя, sd — корень из дисперсии для величины наблюдаемой светимости, P_{10} — вероятность зависить светимость в 10 раз. Истинная светимость равна 2.0, наблюдаемые величины рассчитываются при усреднении по профилю пульса в предположении об изотропии излучения, красное смещение при этом учитывается, как если бы весь свет шел с поверхности НЗ.

H	β	L_{min}	L_{max}	\bar{L}	sd	P_{10}
0.5	0	1.12	2.51	1.94	0.37	0.0
1	0	1.04	2.50	1.99	0.36	0.0
2	0	0.94	2.49	2.05	0.36	0.0
4	0	0.82	2.55	2.14	0.35	0.0
8	0	1.54	5.27	2.31	0.21	0.0
12	0	1.77	10.61	2.44	0.28	0.0
0.5	ff	1.91	2.33	2.04	0.11	0.0
1	ff	1.90	2.30	2.08	0.12	0.0
2	ff	1.89	2.44	2.16	0.14	0.0
4	ff	1.88	2.75	2.23	0.21	0.0
8	ff	1.86	15.76	2.45	0.57	0.0
12	ff	1.86	33.37	2.63	1.04	0.0005

Заключение

В работе представлены результаты моделирования профилей пульса нейтронной звезды с аккреционной колонкой и основанные на этом оценки по измерению ошибок в определении светимости таких объектов. Видно, что при небольших высотах колонки ошибки не являются существенными. С увеличением высоты колонки увеличивается и разброс возможной наблюдаемой светимости, в частности, становятся возможными ошибки на порядок. Это связано с тем, что для высоких колонок из-за линзирования вырастает отношение количества энергии, приходящей в малый телесный угол, к величине этого угла, в направлении магнитной оси. Однако вероятность таких ошибок крайне мала. Заметим, что в данной работе игнорировались неточности, связанные с определением масс, радиусов и расстояний до источников, однако в реальности они вносят существенный вклад в определение истинных светимостей.

Для построения профилей пульса использовались простейшие аппроксимации углового распределения излучения от колонки и атмосферы НЗ, а также пространственного распределения мощности по колонке. Для повышения качества расчетов необходимо включение более точных моделей колонки и атмосферы нейтронных звезд, что является предметом дальнейших исследований.

Библиографические ссылки

- [1] *Mushtukov A. A. et al.* On the maximum accretion luminosity of magnetized neutron stars: connecting X-ray pulsars and ultraluminous X-ray sources // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2015. — Vol. 454. — P. 2539–2548.
- [2] *Poutanen J. et al.* A reflection model for the cyclotron lines in the spectra of X-Ray pulsars // *Astrophys. J.* — 2013. — Vol. 777. — P. 115.
- [3] *Poutanen Juri.* Accurate analytic formula for light bending in Schwarzschild metric // *Astron. Astrophys.* — 2020. — Vol. 640. — P. A23.